

VISUALIZZAZIONE 3D DEL CAMPO ACUSTICO MEDIANTE UN SISTEMA AD ARRAY MICROFONICO SFERICO

G. Brambilla (1), F. Lo Castro (1), A. Cerniglia (2), P. Verardi (1)

1) CNR-Istituto di Acustica "O.M. Corbino", Roma

2) 01dB Italia, Milano

Sommario

L'impiego di array microfonicici associato a tecniche di beamforming permette di ottenere una mappa della distribuzione spaziale del campo acustico nello spazio in esame.

Il sistema impiegato per l'indagine descritta nel presente lavoro è molto compatto e agevolmente trasportabile, essendo costituito da un notebook e un front-end al quale è collegato un supporto sferico, con un diametro di circa 280 mm, sulla cui superficie sono posizionati 31 microfoni e 12 videocamere per riprendere l'ambiente circostante.

Sfruttando la sfericità dell'array è possibile la localizzazione delle sorgenti nelle tre dimensioni e tramite la sovrapposizione delle immagini visive con quelle acustiche riconoscere sorgenti sia fisse che in movimento.

Il sistema presenta numerosi e interessanti campi di applicazione. Nel caso specifico è stato impiegato per determinare il grado di diffusione del campo acustico in una camera riverberante vuota e con pannelli fonoassorbenti introdotti per alterare il campo acustico ivi presente.

Introduzione

Le capacità sempre più evolute dei sistemi digitali permettono di implementare, in tempo reale, algoritmi complessi per il trattamento dei segnali.

Normalmente i campioni acquisiti vengono filtrati per eliminare le componenti indesiderate, agendo sulle frequenze e riducendo o amplificando determinate porzioni dello spettro del segnale. Quando però le interferenze hanno le stesse frequenze del segnale utile, la loro attenuazione risulta difficile se all'algoritmo di filtraggio non vengono fornite ulteriori informazioni, come le direzioni delle sorgenti interferenti, costituendo così un filtro spaziale. Aumentando il numero dei sensori è possibile una più accurata localizzazione delle sorgenti.

Un metodo utile ad implementare un filtro spaziale è quello del “beamforming”, che utilizza contemporaneamente un array di sensori e ne elabora i segnali sfruttando il fenomeno dell’interferenza costruttiva e distruttiva delle onde. In questo modo si amplificano i segnali provenienti da una specifica locazione e si attenuano quelli provenienti da altre direzioni.

L’implementazione di un filtro spaziale richiede l’elaborazione dei dati raccolti in una finestra spaziale, cioè da più sensori in uno stesso istante di tempo, al contrario di un filtro temporale che opera su una finestra temporale di dati raccolti da un solo sensore. Un tipico algoritmo di beamforming, spesso considerato per la sua semplicità, è quello utilizzato per il trattamento di segnali a banda stretta (figura 1).

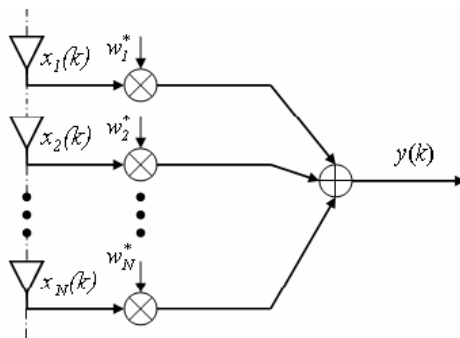


Figura 1 - Beamformer a banda stretta

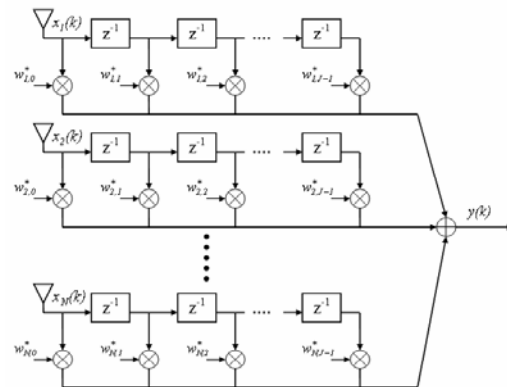


Figura 2 - Beamformer a banda larga

L’array di sensori effettua un campionamento spaziale discreto dell’onda incidente, producendo l’insieme $[x_1(k), x_2(k), \dots, x_N(k)]$ di dati provenienti dagli N sensori all’istante temporale k . I campioni, pesati tramite i coefficienti w_n^* , vengono poi combinati linearmente dal beamformer, fornendo in uscita un dato y per ogni istante di tempo k , definito da:

$$(1) \quad y(k) = \sum_{n=1}^N w_n^* x_n(k)$$

dove $*$ rappresenta l’operatore complesso coniugato, ricordando che sia i coefficienti w_n sia i dati x sono numeri complessi.

Per segnali a banda larga il diagramma di figura 1 deve essere modificato come in figura 2 e il suo risultato è espresso da:

$$(2) \quad y(k) = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{J-1} w_{n,i}^* x_n(k-i)$$

Vettorialmente la (1) e la (2) possono essere riscritte come:

$$(3) \quad \mathbf{y}(k) = \mathbf{w}^H \mathbf{x}(k)$$

dove: \mathbf{w} è il vettore dei coefficienti (pesi), opportunamente definito;
 $\mathbf{x}(k)$ è il vettore dei dati;
 H è l'operatore hermitiano (trasposto coniugato).

Per un'onda piana incidente sul sensore n -esimo con un'angolazione ϑ rispetto al piano dei sensori e ritardo $\tau(\vartheta)$ rispetto al primo sensore, si ricava:

$$(4) \quad x_n(k) = e^{j\omega(k-\tau_n(\theta))}$$

che sostituito nella (1) fornisce:

$$(5) \quad y(k) = e^{j\omega k} \sum_{n=1}^N w_n^* e^{-j\omega\tau_n(\theta)} = e^{j\omega k} r(\omega, \theta)$$

dove $r(\omega, \theta)$ è la funzione risposta del "beamformer":

$$(6) \quad r(\omega, \theta) = \sum_{n=1}^N w_n^* e^{-j\omega\tau_n(\theta)} = \mathbf{w}^H \mathbf{d}(\omega, \theta)$$

e $\mathbf{d}(\omega, \theta)$ il vettore direzionale contenente gli sfasamenti.

Geometricamente l'angolo tra \mathbf{w} e $\mathbf{d}(\theta, \omega)$ determina la risposta $r(\theta, \omega)$. Per esempio, se per alcuni valori di (θ, ω) l'angolo tra \mathbf{w} e $\mathbf{d}(\theta, \omega)$ è 90° (\mathbf{w} ortogonale a $\mathbf{d}(\theta, \omega)$), allora la risposta è nulla. Al contrario se l'angolo è prossimo a 0° , il modulo della risposta sarà relativamente grande. La capacità di discriminare spazialmente sorgenti a diverse posizioni e/o frequenze, come (θ_1, ω_1) e (θ_2, ω_2) , dipende dall'angolo tra i vettori direzionali $\mathbf{d}(\theta_1, \omega_1)$ e $\mathbf{d}(\theta_2, \omega_2)$ e, quindi, dalla disposizione geometrica dei sensori sull'array.

Il criterio per calcolare i coefficienti \mathbf{w} a partire da \mathbf{d} e da r determina il tipo di beamformer utilizzato, distinguibile in:

- *data-independent* beamformers;
- *statistically optimum* beamformers.

Nel *data-independent* beamformer i coefficienti non dipendono dai dati acquisiti, ma sono scelti a priori per fornire una risposta dell'algoritmo ai segnali di ingresso.

Nel *statistically optimum* beamformer, invece, i coefficienti sono scelti in base alla statistica dei dati ricevuti, cercando di ottimizzare la risposta del sistema.

Poiché i parametri statistici utili al calcolo dei coefficienti possono variare nel tempo, ad esempio se le sorgenti interferenti sono mobili, essi possono essere determinati mediante algoritmi adattativi, basati principalmente su due diverse strategie:

- *adattività a blocchi*, dove i parametri statistici sono prima stimati da un blocco temporale di dati e poi sono utilizzati nell'equazione per il calcolo dei coefficienti ottimali;
- *adattività continua*, dove i coefficienti sono aggiornati ad ogni passo di campionamento affinché il risultante vettore dei coefficienti converga alla soluzione ottima.

In caso di ambiente non stazionario si può utilizzare l'adattività a blocchi purché i coefficienti siano ricalcolati periodicamente. L'adattività continua, invece, è preferibile solitamente quando i parametri statistici sono tempo-varianti o, per ragioni computazionali, quando si ha un numero ridotto di coefficienti adattativi.

L'esperimento

L'obiettivo dell'esperimento è quello di valutare le prestazioni di un array microfonico e dell'elaborazione, tramite beamforming, dei segnali acquisiti per ottenere la mappa del campo acustico in condizioni di diffusione sonora omogenea.

A tale scopo è stato utilizzata la coppia di camere riverberanti dell'Istituto di Acustica, all'interno della quale è stato posto un array microfonico sferico composto da 31 microfoni (figura 3) collegati ad una scheda di acquisizione a 16 bit. Il sistema, che utilizza un beamformer adattativo a blocchi (con un blocco minimo di 1024 campioni), esegue l'analisi in frequenza tra 250 Hz e 6300 Hz.

Per la sonorizzazione della camera riverberante è stato utilizzato una sorgente sonora dodecaedrica, alla quale era inviato un rumore rosa. L'apparato sperimentale è illustrato nella figura 4.

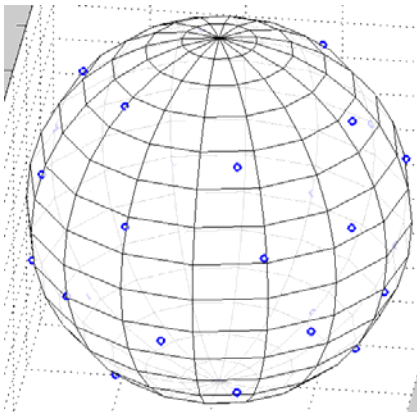


Figura 3 – Posizione dei microfoni sull'array sferico



Figura 4 – Vista della camera riverberante con la sorgente sonora dodecaedrica posta sullo sfondo e in primo piano l'array microfonico sferico

L'esperimento è stato articolato nelle seguenti fasi:

1. Mappatura della camera riverberante, avente volume di 118 m^3 e superficie complessiva di 164 m^2 , per l'individuazione di eventuali direzioni privilegiate di propagazione del campo acustico.
2. Ulteriore mappatura con l'introduzione nella camera riverberante di una disomogeneità acustica prodotta da 5 pannelli fonoassorbenti in lana minerale da $600 \times 120 \times 15 \text{ mm}$ usati per controsoffittature per una superficie complessiva di 3.6 m^2 , posti in verticale a circa 60 mm da una parete (figura 7).
3. Confronto tra le due configurazioni sperimentali.
4. Individuazione dei vantaggi ottenibili con la tecnica del beamforming rispetto al calcolo della variazione del tempo di riverberazione sulle direzioni corrispondenti a ciascun microfono dell'array.

Risultati e discussione

L'analisi dei segnali elaborati con il sistema di beamforming utilizzato ha un'apertura angolare di 5° . Ciò permette di aumentare le direzioni di osservazione dei 31 microfoni a più di 2500 direzioni. Un esempio del campo sonoro rilevato in corrispondenza dell'array microfonico, in condizioni stazionarie e a camera riverberante vuota, è mostrato in figura 5.

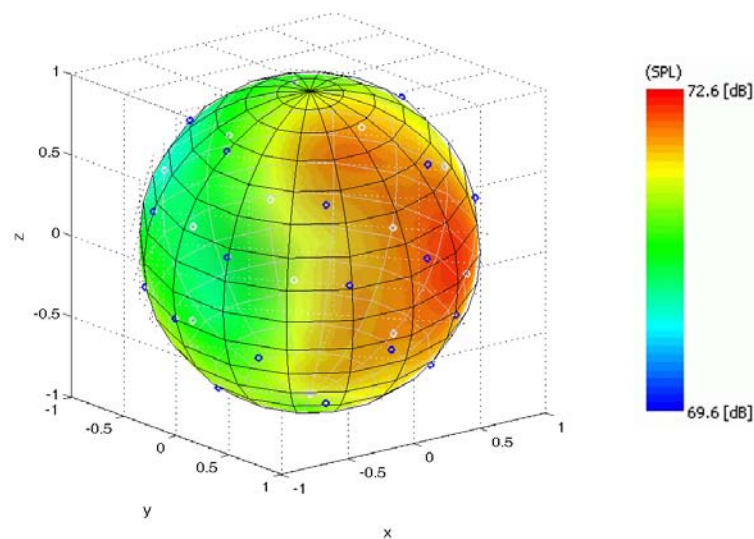


Figura 5 – Mappa 3D, ottenuta mediante beamforming, del campo acustico generato da una sorgente posta frontalmente all'array microfonico in camera riverberante vuota

La mappa è a largo spettro (da 500 Hz a 4000 Hz) e l'area in rosso è la zona dell'array posta frontalmente alla sorgente sonora. È da evidenziare che l'intero campo sonoro presenta variazioni contenute in 2 dB , dimostrando nella regione esaminata una buona diffusione.

Un'altra rappresentazione del campo sonoro è riportata in figura 6, dove sono illustrate le sei proiezioni dell'array sferico, ognuna vista da un lato della camera riverberante, per la banda di ottava centrata a 2000 Hz . Si osserva come a tale banda la sorgente

te non è più localizzata ma prevalgono riflessioni in varie direzioni, comunque di ampiezza non superiore a 1.5 dB rispetto al campo diffuso.

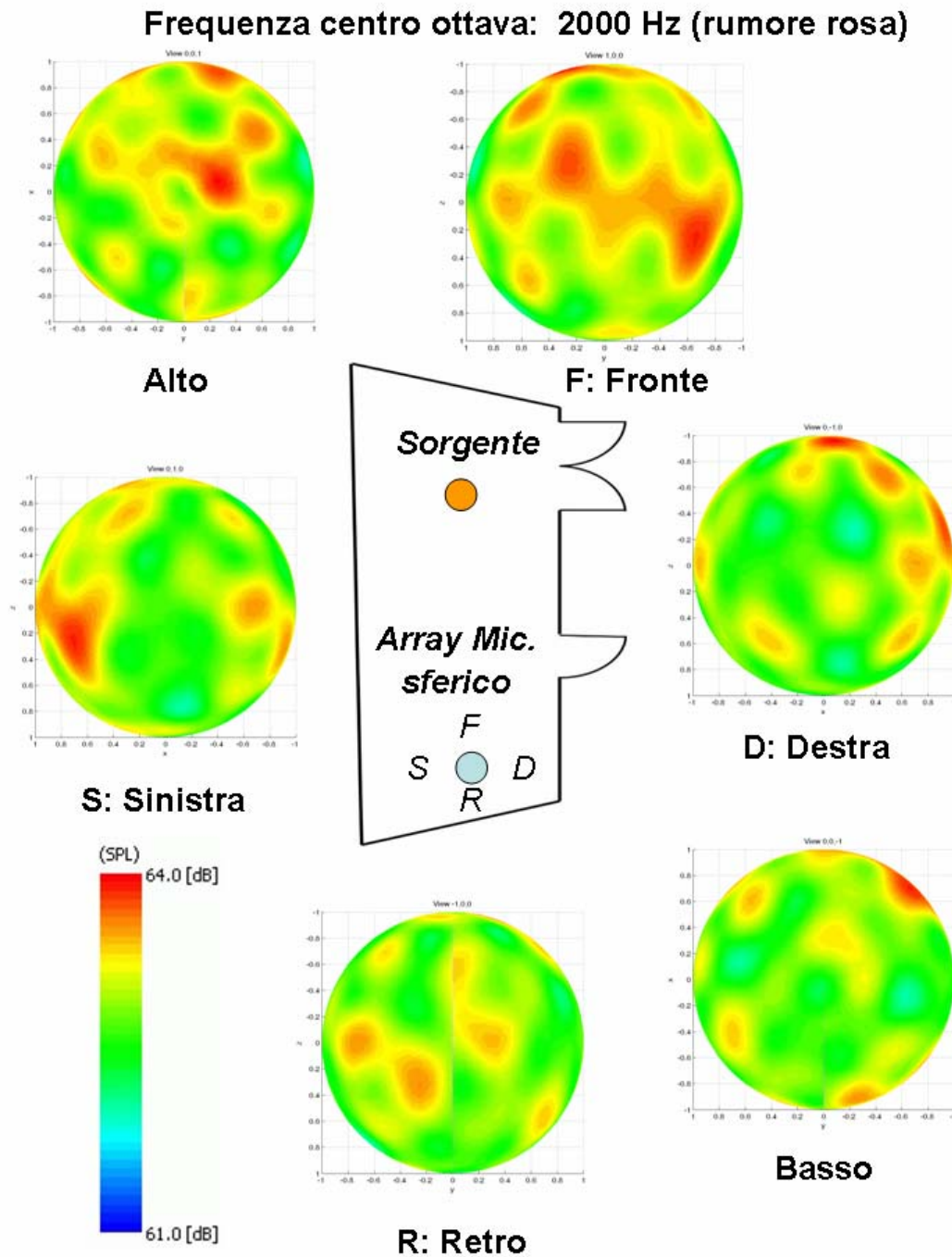


Figura 6 – Proiezioni dell'array sferico con rappresentazione dei livelli di pressione sonora rilevati dall'array sferico nella camera riverberante vuota

Nella figura 7 sono riportate le mappe differenza dei livelli di pressione sonora rilevati senza e con i pannelli fonoassorbenti posti all'interno della camera riverberante. Si

nota come la presenza dei pannelli modifichi il campo acustico prevalentemente nelle direzioni ove erano posti i pannelli (zone colorate in blu).

Banda di frequenza: 500 - 4000 Hz (rumore rosa)

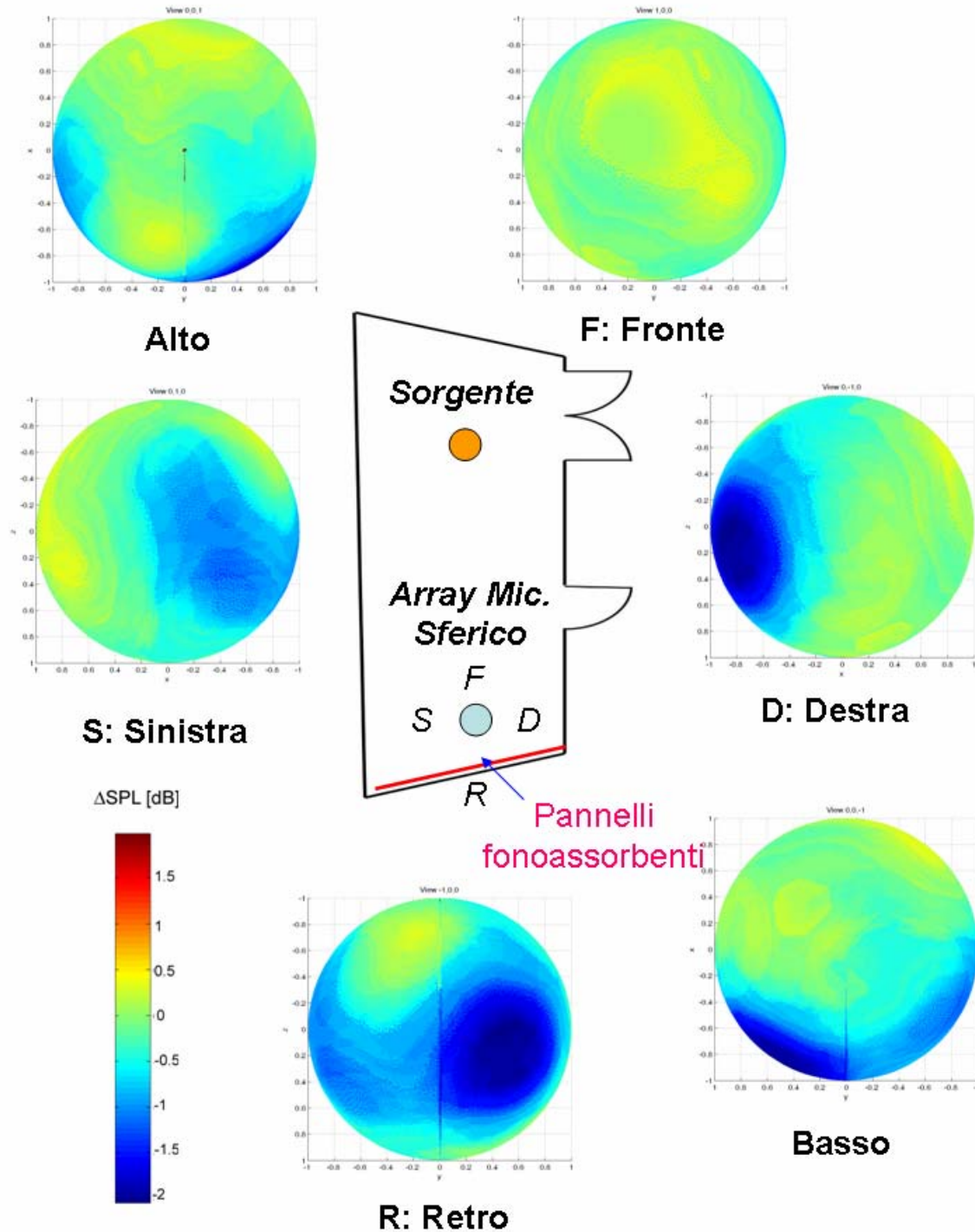


Figura 7 – Proiezioni dell’array sferico con rappresentazione della differenza dei livelli di pressione sonora rilevati nella camera riverberante senza e con i pannelli fonoassorbenti

Sovrapponendo, inoltre, all'immagine della camera riverberante fornita dalle videocamere poste sull'array sferico la mappa acustica elaborata con il beamforming, risulta immediata l'individuazione di posizione ed entità della variazione di campo dovuta ai pannelli (figura 8).

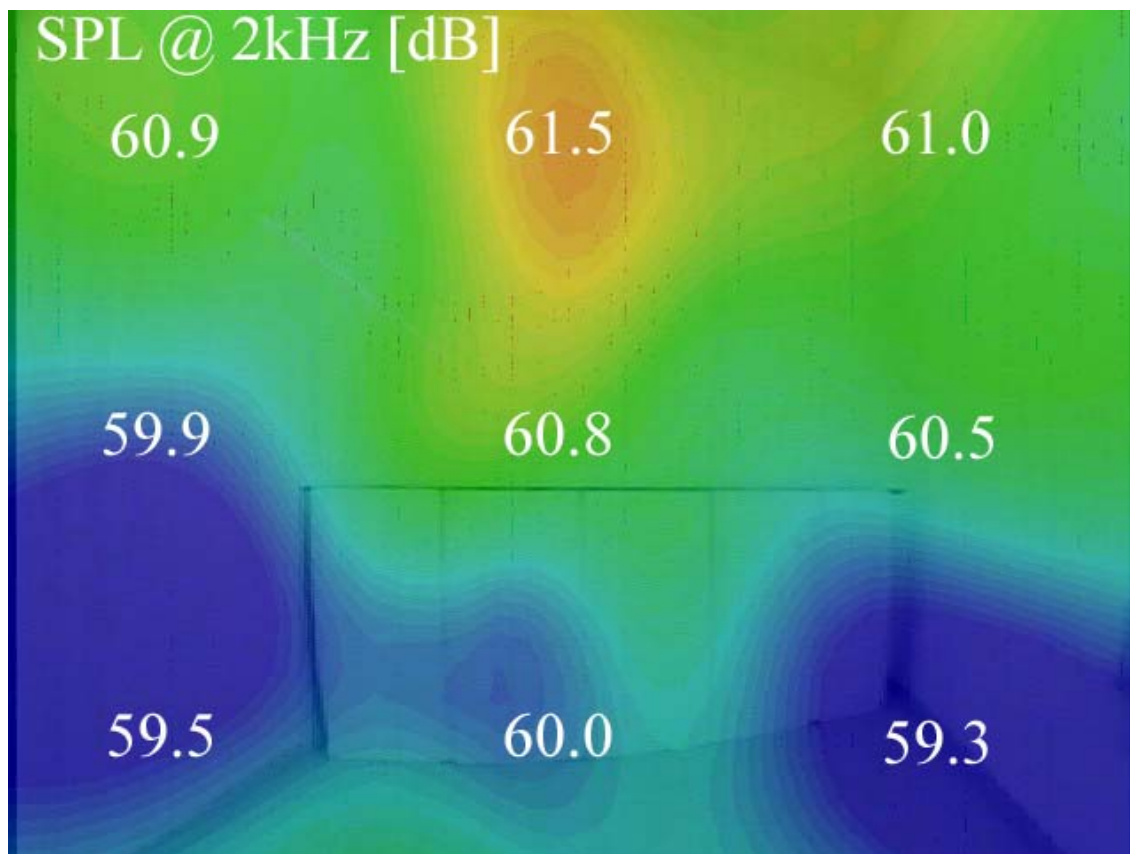


Figura 8 – Sovrapposizione della mappa acustica e dell'immagine della camera riverberante ottenuta mediante le videocamere presenti sull'array sferico

Anche l'analisi dei tempi di riverberazione effettuata sui segnali dei 31 microfoni, senza beamforming, è in grado di rilevare la presenza dei pannelli fonoassorbenti. Nella direzione in cui erano posti i pannelli, infatti, si osserva la maggiore differenza dei tempi di riverberazione tra la situazione con e senza pannelli come illustrato nella figura 9, ove tale differenza è rappresentata con una scala cromatica sulla superficie dell'array in corrispondenza della posizione dei microfoni. È evidente l'assenza di informazione per gli altri punti della superficie sferica, contrariamente a quanto ottenuto con il beamforming (vedi figura 10) che, mediante l'elaborazione dei segnali acquisiti con lo stesso hardware, è in grado di estrarre l'informazione sulle direzioni mancanti.

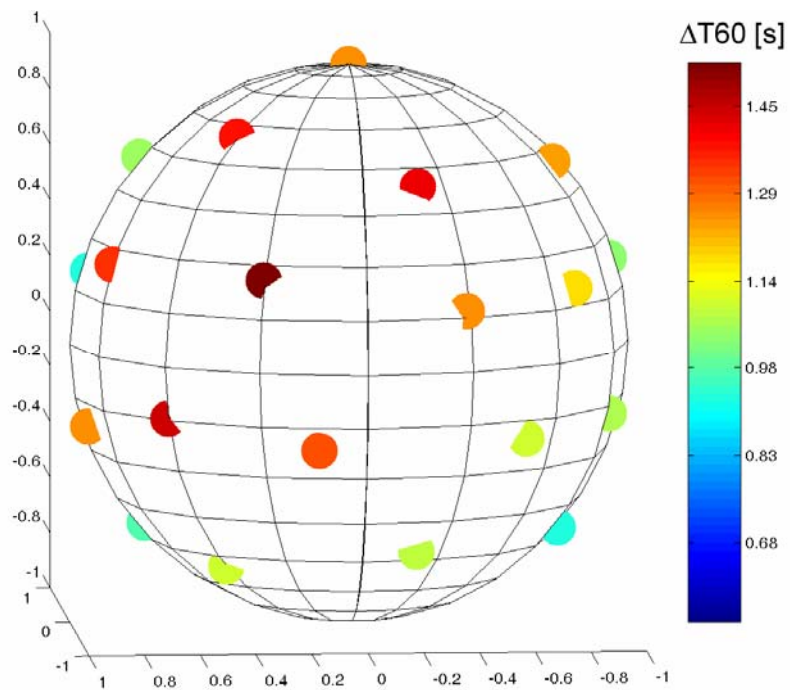


Figura 9 - Differenza dei tempi di riverberazione rilevati nella camera riverberante senza e con i pannelli all'interno

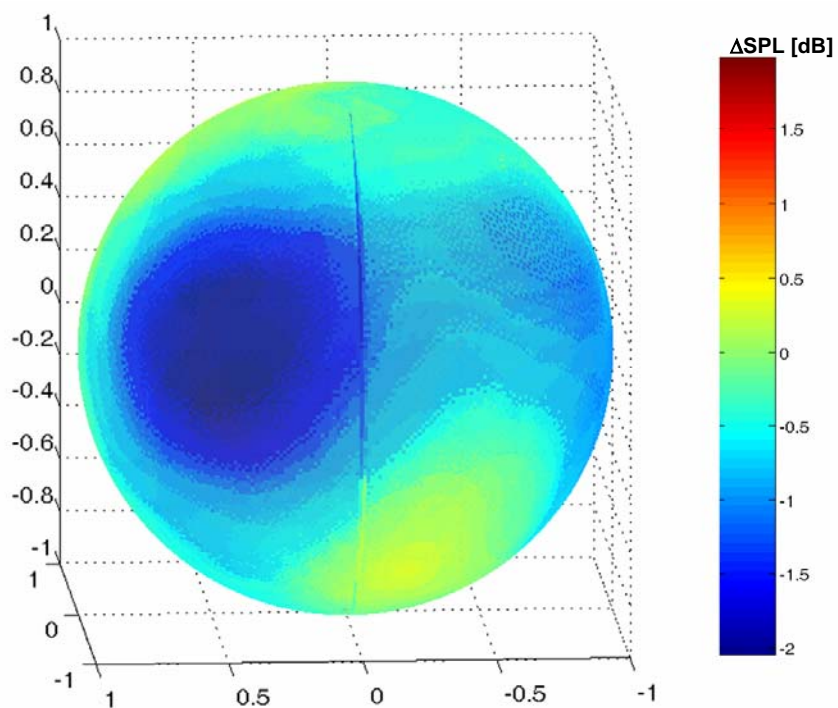


Figura 10 - Differenza tra i livelli di pressione sonora rilevati nella camera riverberante senza e con i pannelli all'interno

Conclusioni

Con l'esperimento sopra descritto si sono volute valutare le potenzialità dell'algoritmo del beamforming in un campo acustico "arduo" per tale tecnica, come quello diffuso presente in camera riverberante.

La tecnica del beamforming ha permesso di rappresentare con buona risoluzione spaziale, 5° di apertura angolare, la distribuzione dei livelli di pressione sonora sulla superficie dell'array sferico dove erano posti i 31 microfoni.

L'introduzione di una perturbazione del campo sonoro, dovuta all'inserimento nella camera riverberante di pannelli fonoassorbenti, è stata rilevata più dettagliatamente rispetto al metodo della variazione del tempo di riverberazione, fornendo posizione ed entità della variazione di campo anche nelle direzioni diverse da quelle dei microfoni.

Bibliografia

- [1] Christensen J.J., Hald J., "Beamforming", Brüel & Kjær Technical Review No. 1, 2004.
- [2] Cerniglia A., Valente T., Costa A., "Identificazione delle sorgenti sonore con la tecnica beamforming", Atti 4^a Convention Nazionale dei Responsabili dell'Igiene e Sicurezza negli Ambienti di Lavoro, Modena ottobre 2006.
- [3] V.C. Raykar, "A study of a various Beamforming techniques and implementation of the constrained Least Mean Squares (LMS) algorithm for Beamforming Graduate Student", Department of Electrical and Computer Engineering, University of Maryland, College Park, 2001.
- [4] Naldi G., "Analisi di algoritmi adattativi di beamforming applicabili alla radioastronomia e studio dell'implementazione della klt (karhunen-loève transform) per schiere di antenne", Tesi di laurea a.a. 2005-2006, Università degli Studi di Bologna, Facoltà di Ingegneria.
- [5] Takashima K., Nakagawa H., Tanaka N., Sekito D., "Impulse response measurement system and its recent applications", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 120, No 5 pt. 2, pp. 3226, 2006.
- [6] Gover B.N., Ryan J.G., Stinson M.R., "Measurements of directional properties of reverberant sound fields in rooms using a spherical microphone array", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 116, No. 4, pp. 2138-2148, 2004.
- [7] Lurati M., Ripamonti F., Rocchi D., Vanali M., "Utilizzo di array microfonic per la localizzazione di sorgenti sonore: confronto tra diverse configurazioni dei microfoni e validazione sperimentale", Rivista Italiana di acustica Vol. 30 N. 3-4, pp. 79-93, 2006.